

## 門池の水質と水深

竹口 昌之\*、高橋 駿平、芳野 広起、鈴木 裕貴、渡辺 彩夏、勝又 俊貴、  
松下 真太郎、三輪 史朗、松本 祐子、芳野 恭士  
沼津工業高等専門学校 物質工学科 (〒410-8501 静岡県沼津市大岡 3600)  
\*takeguch@numazu-nct.ac.jp

## Water Quality and Depth in Kado-ike

Masayuki TAKEGUCHI, Shunpei TAKAHASHI, Hiroki YOSHINO, Yuki SUZUKI, Ayaka  
WATANABE, Shunki KATSUMATA, Shintaro MATSUSHITA, Shiro MIWA, Yuko  
MATSUMOTO, Kyoji YOSHINO

National Institute of Technology, Numazu College (3600 Ooka, Numazu, Shizuoka 410-8501, Japan)

(Received November 9, 2018; Accepted January 6, 2019)

### Abstract

Algal bloom is a serious problem in Kado-ike, an irrigation pond in Numazu City, Shizuoka. Therefore, it is important to understand the relationships among water quality and topographic features. In this study, we surveyed the water quality and measured the water depth at 14 sites in Kado-ike on September 19, 2015. In Kado-ike, the water color was dark green, and algal bloom was seen mainly in the area close to the outlet. The pH of the water at any point in Kado-ike was 8 or more alkaline, making it suitable for the proliferation of algae. The chemical oxygen demand (COD) and various nitrogen and phosphorus compounds in the area close to the inlet were higher than at other sites. These results show good agreement with computational fluid dynamics solutions. Kado-ike was roughly divided into two areas in the results of water depth measurements: the east area, at a depth of 3 meters, and the west area, at a depth of 4 meters. COD and ammonia nitrogen at any pond bottom were higher than those at the water surfaces, and it is thought that suspended solids accumulate.

**Keywords:** Water quality, Water depth, Algal bloom, Computational fluid dynamics, Kado-ike

### 1. 緒言

農業灌漑用ため池である門池（静岡県沼津市）は、流入水の水量や天候により 6 月から 10 月にかけてアオコ（藍藻類の細胞が集合し群体を形成）が発生することがある[1]。平成 19 年 6 月に門池にて大発生したアオコを Figure 1 に示す。一般に、アオコの発生は水の滞留（閉鎖性水域）[2]、20℃以上の水温[2,3]、高リン濃度・高 pH の水質[3]が

原因であると報告されている。アオコの発生により閉鎖性水域の生態系バランスが崩れ、酸素欠乏、富栄養化および栄養塩類の池底への堆積が進行すると考えられており[2]、門池周辺では悪臭や景観を損ねるなどの問題が生じている。市街地に位置し、河川下流域の水を貯めるという機能を有する農業灌漑用ため池において、水とともに栄養塩類も貯留することから富栄養化は避けられない



Figure 1 Algal bloom in irrigation reservoirs, Kado-ike Pond (24th June, 2007).

課題である[3]。そのため門池の水域の特徴を十分考慮してアオコ対策を実施することが求められる。

アオコの発生は湖沼内の水の流れと水深に影響されるが、これまでにこの観点で門池の調査を行っていない。そこで本論文では門池の水質保全を目的として、水域の水質を数値シミュレーションによって得られた平面流れの結果から考察した。加えて、門池の水深調査を行ない水深方向の水質変化を明らかにした。

## 2. 実験

Figure 2 に示す門池内の水質調査 (14ヶ所: A2, A3, A5, A7, A10, B1, B2, B4, C1, C2, D1, D2, E, In) および水深調査 (8ヶ所: 水質調査箇所に加えて A1, A4, A6, A8, A9, A11, B3, C3) を平成 27 年 9 月 19 日 (平均気温 23.0°C、日照時間 7.9 時間[4]) に実施した。事前に門池公園の使用については沼津市都市計画部緑地公園課、門池の水面利用については沼津市産業振興部農林農地課より承諾を得た。

水面の試料水はロープ付きバケツまたはボートより直接試料採取容器に採取した。底部の試料水については 500 mL 容ハイロート採水器により

Table 1 Testing items in water quality

調査項目	バックテスト*	測定範囲
pH	WAK-pH	pH 5.0 - 9.5, 0.5 increment 10 step
化学的酸素要求量 (COD)	WAK-COD	0, 5, 10, 13, 20, 50, 100 mg/L
亜硝酸/亜硝酸態窒素	WAK-NO2	0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1 mg/L
硝酸/硝酸態窒素	WAK-NO3	1, 2, 5, 10, 20, 45 mg/L
アンモニウム/アンモニウム態窒素	WAK-NH4	0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10 mg/L
りん酸/りん酸態りん	WAK-PO4(D)	0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 mg/L

\* 共立理化学研究所簡易水質測定器

採取した。

### 2.1 水質調査

透視度はポータブル透視度センサ (TP-M100 : OPTEX) を用いて測定した。電気伝導度は電気伝導度計 (Twin Cond B-173 : HORIBA) を用いて測定した。菌体数はメンブレンフィルターを用いた生菌数検出簡易キット (Total Count Water Tester MT0010025, Millipore) を使い、培養温度 30°C で 48 時間培養後、メンブラン上のコロニー数を計測した。その他の水質調査は Table 1 に示す(株)共立理化学研究所のバックテストを用いた。

### 2.2 藻類調査

顕微鏡用デジタルカメラ (DP-21 : OLYMPUS) を装着した生物顕微鏡 (CX31, OLYMPUS) を用いて採取した試料中の植物プランクトンの観察を行なった。

### 2.3 門池内流れの数値計算法

本研究では門池の地形図より計算格子を作成し、数値流体解析ソフト OpenFOAM[5]を利用して格子上で記述された支配方程式を有限体積法で解いた。計算格子は、Netgen を用いて作成した[6]。支配方程式は以下に示す連続の式およびナビエ-ストークス方程式である。本研究では 2 次元非定常非圧縮性流れとし、深さ方向の y 軸を湖

面とした座標系として  $(x, z)$  座標を用いた。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) + w \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right) + w \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

ここで、 $(u, w)$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] は  $(x, z)$  方向の流速、 $\rho$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] は流体の密度、 $p$  [ $\text{Pa}$ ] は圧力、 $\nu$  [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ] は動粘性係数である。各物性値は水の  $20^\circ\text{C}$  における値を用いた。本研究の数値計算には、Open  $\nabla$  FOAM の標準ソルバである非定常非圧縮性層流ソルバの icoFoam を用いた[5]。初期条件として、時刻  $t=0$  で流れは静止しているものとする。境界条件として、門池の壁面では流速が  $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  であるとし、流入口では先行実験により境界面の法線方向に  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  とした[7]。流出口はともに自由流出とした。計算は、門池内に流れが十分発達したと判断できるまで行なうこととし、試行計算により、計算終了時刻は 3600 秒とした。

## 2.4 水深調査

門池内をボートにて移動し、ポータブル測深機 (PS-7AFL : HONDA ELECTRONICS) を用いて水深を調査した。また、門池公園内 2 か所よりレーザー距離計 (550AS : Nikon) を用いてボートの位置を測定し、その交点から大凡のボートの位置を確定した。

## 3. 結果および考察

### 3.1 門池の水質

平成 27 年 9 月 19 日に Figure 2 に示す門池内 14 カ所 (A2, A3, A5, A7, A10, B1, B2, B4, C1, C2, D1, D2, E, In) についての水質調査を実施した。門池 (静岡県沼津市) に隣接する気象観測施設 (静岡地方気象台 特別地域気象観測所) の気象データにより調査日は日照時間 7.9 時間、平均気温  $23.0^\circ\text{C}$ 、最高気温  $29.1^\circ\text{C}$  の快晴であった。水質調査地点と

して門池の地形図より 5 区分 (A 地点 : 北西部、B 地点 : 南西部、C 地点 : 中西部、D 地点 : 中東部、E 地点 : 東部) に分けた。門池への流入水は主として黄瀬川を水源とする牧堰用水路から Figure 2 に示す In 地点より供給されている。その他に門池に隣接する門池公園遊具広場を流れる河川からの流入水が E 地点北部より供給されている。門池は農業灌漑用ため池であり、B3 地点に牧堰用水路に再流出する配水塔がある。加えて、門池用水の一部は門池北西部から南東部にかけて沿って流れる渡戸川放水路に A1 地点と A2 地点近くの水辺から流出している。

水質調査の結果を Figure 2 に示す。化学的酸素要求量 (COD) は流入口近くの D2 地点、E 地点を除き、 $5 \text{ mg/L}$  程度であった。一方流入口近くの COD は  $13\sim 50 \text{ mg/L}$  を示し、流入水には有機物が含まれるが門池内に滞留することで水中の COD は低下することがわかった。このことは、門池は流水中の有機物を蓄積または二酸化炭素として大気中に放出して有機物のバランスを保持していると考えられる。

一般に水産用水としてコイ、フナ等には  $5 \text{ mg/L}$  以下、農業用水としては溶存酸素の不足による根ぐされ病の防止の点から  $6 \text{ mg/L}$  以下が望ましいとされている[8]。COD 測定値は門池がヘラブナを釣ることができる場所であり、また農業灌漑用水として利用可能であることを示している。門池はヘラブナの釣場としても知られている。

pH は調査場所によらず  $8.0\sim 9.0$  のアルカリ性を示した。加えて、A2 地点を除き透視度は  $33.1\sim 40.7 \text{ cm}$  であった。門池の湖面は全般的に緑色であった。特に A2 地点は透視度も  $14.5 \text{ cm}$  と低く、緑色を帯びていた。A2 地点の採取水を生物顕微鏡で観察したところ、Figure 3 に示す形態学的に藍藻網と考えられる植物プランクトンが観察された。水中の二酸化炭素は空気中の二酸化炭素と平衡状態にあるが、大量の植物プランクトン

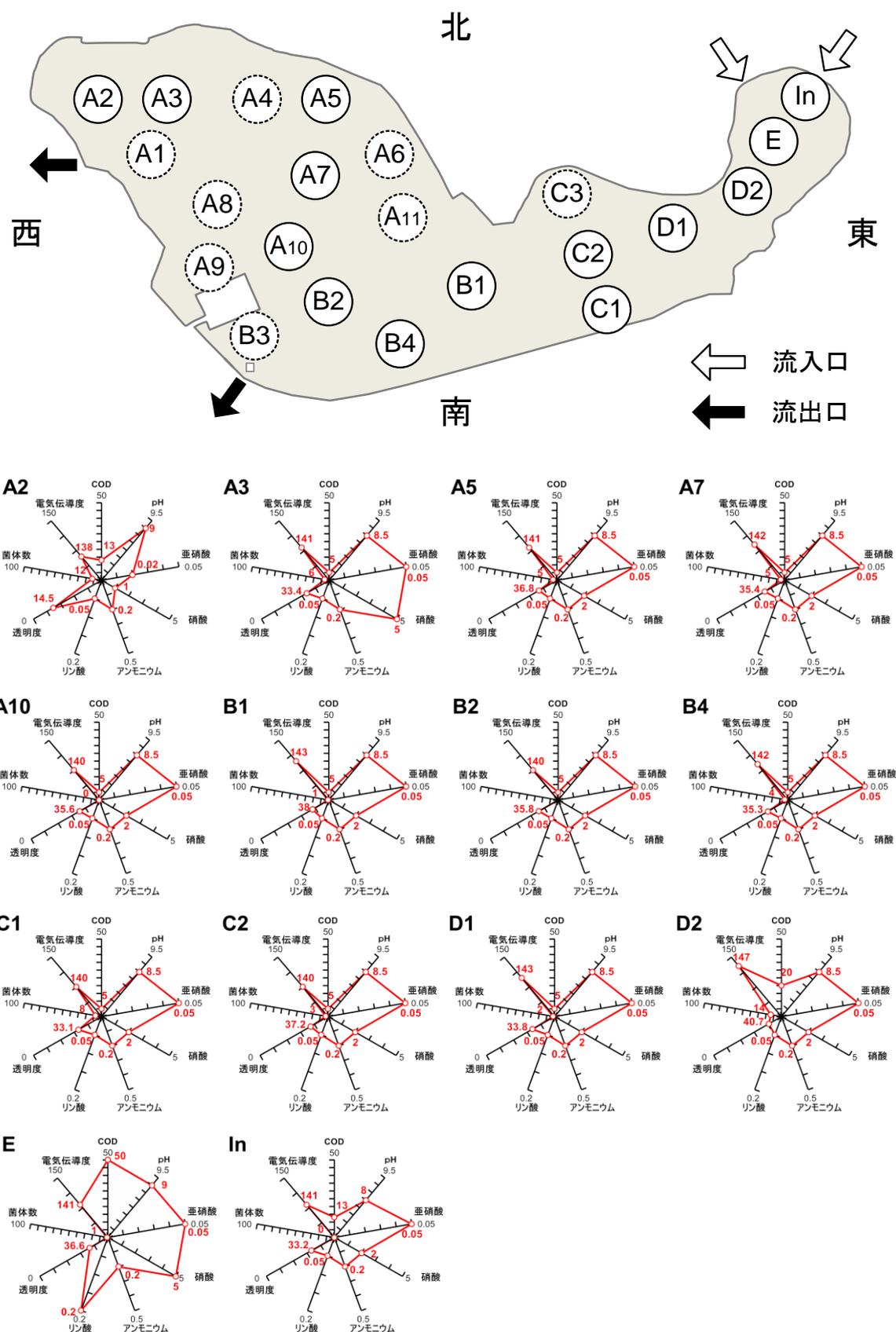


Figure 2 Survey points and the result of the water quality survey in Kado-Ike.

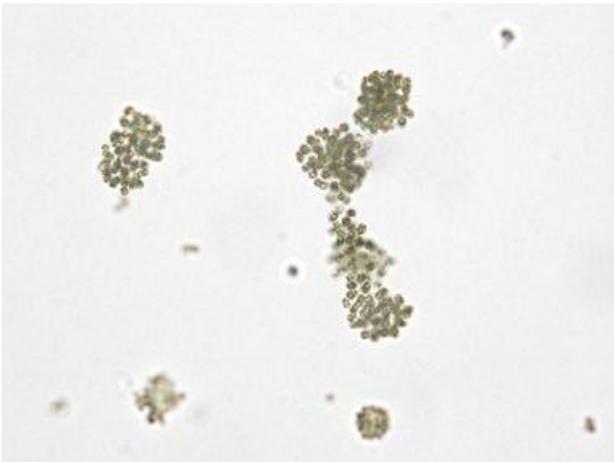


Figure 3 Phytoplankton in A2 site, Kado-ike (400x magnification).

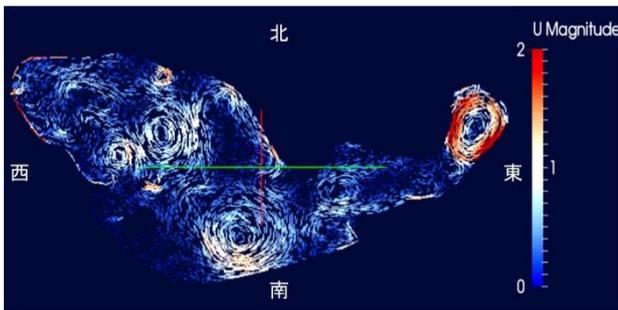


Figure 4 Flow velocity vector by computational fluid dynamics.

が日中に一齐に光合成を行なうことで平衡状態が崩れアルカリ性を示したと考えられる。

アンモニウム態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素は流入口 (E) および流出口 (A2, A3) を除くと調査場所によらずそれぞれ 0.2 mg/L、0.05 mg/L、2 mg/L であった。流入口付近の E 地点と流出口付近の A3 地点では窒素が最も酸化された状態である硝酸態窒素濃度が高かった。流出口である A2 地点は亜硝酸態窒素と硝酸態窒素の濃度が他の場所に比べ低かった。

リン酸態りんは E 地点を除き、0.05 mg/L であった。E 地点のリン酸態りんは 0.2 mg/L であり、加えて、他の地点に比べ COD、硝酸態窒素も高い値を示した。門池には黄瀬川からの流入水 (In 地

点) に加え、E 地点の北側河川からも流入水がある。In 地点のリン酸態りんおよび硝酸態窒素も E 地点に比べて低いことから、E 地点の北側河川から生活排水が流入している可能性がある。

電気伝導度は全採取地点で 140~147  $\mu\text{S}/\text{cm}$  の範囲に収まった。わが国の平均的河川の電気伝導度は 110  $\mu\text{S}/\text{cm}$  とされており [7]、門池はほぼ平均的な数値を示している。

### 3.2 門池内の水の流れ予測

門池への流入水は主として黄瀬川を水源とする牧堰用水 (In地点) であり、その他に門池北東部河川 (E地点北側) や一部には門池内の湧水よるとされている [9]。一方、門池からの流出水は配水塔 (B3地点) と門池に隣接して流れる渡戸川放水路 (A2地点付近) より流出している。門池は農業灌漑用ため池であるため牧堰用水からの流入量は門池牧堰用水運営委員会が管理しており、その使用目的から季節により変動がある。そのため、門池内の水の流れについて特定期間の実測値を得ることは不可能と考え、数値計算によるモデルを構築することを目指した。

本研究では門池の地形図より計算格子を作成し、数値流体解析ソフト OpenFOAM を利用して格子上で記述された支配方程式を有限体積法で解いた。計算格子は Netgen を用いて作成したプリズム格子を使用した。格子数を約 7000、13 万、22 万として計算したところ、格子数 13 万と 22 万では有意な差が見られなかったため、以下では格子数 13 万の結果について述べる [9]。

数値計算結果を Figure 4 に示す。Figure 4 は流速ベクトル図を示し、赤色が最大流速  $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、青色が流速  $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  を示している。これより流入口付近 (In, E, D2) では渦状の流れが生じていることが考えられる。また、流出口である A2 地点と配水塔近くのア9、B3 地点では流れが停滞していることが考えられる。また、門池内にはいくつかの渦状の流れ (A7 付近, A8 付近, B1・B2・B4 付近, C2

付近)が生じていることも考えられる。

3.1節で述べた水質調査の結果より、流入口付近、流出口付近以外はほぼ同じ水質結果を示していた。流入口付近では牧堰用水から比較的高いCODを有する流入水がE地点北部の河川からの生活排水も加わり、比較的速い流速で渦状流れを形成し、E地点で示すような高いCOD、リン酸態りんおよび硝酸態窒素が保持されていると考えられる。一方、流出口付近では流速が低いため閉鎖性水域となり植物プランクトンが増殖し、A2地点に示すように透視度の低下とともにpHがよりアルカリ性にシフトしていると考えられる。池全体に複数の渦状流れが生じているため、流入口付近、流出口付近を除くと池全体にほぼ同一の水質となる結果が得られたものと考えられる。

### 3.3 門池の水深と水辺

門池内の水深方向における水質の変化を明らかにするために、門池内をボートで移動し、水深計を用いて水深を調査した。また、門池公園内2か所よりレーザー距離計を用いてボートの位置を測定し、その交点からボートの位置を確定した。湖面でのボートは短時間であっても風速の影響を受けること、加えて使用したレーザー距離計は距離表示が1mスケールであることを考慮すると、測定地点は大凡の位置である。

水深測定の結果をFigure 5に示す。Figure 5の上段は各測定地点の深さを数値とともに円の大きさを示している。門池の水深は東側から西側に向かって深くなっており、県道22号線柏木橋(C1付近)を境に東側が約3m、西側が約4mであった。門池は鎌倉時代初期に上津池(かみついけ)と言われていたが、いつからため池として利用されていたか不明である[10]。正保2年(1645年)に拡張工事が行なわれ、牧堰用水を補助用水とした牧堰・門池用水が成立し現在の門池の原型となったとされている[11]。明治30年代後半から土砂の堆積が著しくなり、池の東側と北西部は早くか

ら池底が浅くなり葦も茂り、鴨猟も行われていた記録がある[11]。本測定結果は、門池のこうした成り立ちを反映している。上津池に由来する門池西側部分は水深がほぼ4mであることから、池底部は平坦と考えられる。

沼津市は門池の外周に園路・芝生広場を整備し、その一帯を親水公園として整備している。門池の周囲、約1.3kmの遊歩道は地域の人々に散歩・ウォーキングコースとして利用されている。沼津市が門池整備のために池の水を排水した際、水辺の測量を行なった。その際は、水深の浅い東側部分の湖底が露出したが、配水塔付近は最深部(4.0m)より浅いためより西側には湖水が残存していた。代表的な7地点(A~K)について、水辺の測定結果をFigure 5の下段に示した。門池の水辺の法面はコンクリートや鉄線で編んだ網に砂利を詰め込んだ蛇かごで整備されており、ビオトープとして整備された一部の区間(地点カの北部)と蛇かごを足場に生育した葦を除き、沿岸植生帯はほとんど存在しない。

### 3.4 門池の水深と水質

門池内の水深方向に対する水質の影響を明らかにするために、門池内4地点の湖面水と湖底水を採取し水質調査を行なった。

Figure 5の門池内4地点(A2, A7, B2, D2)の水質調査の結果をFigure 6に示す。Figure 6は各地点の水質調査の結果をレーダー図で示しており、青色が水面、赤色が底部の測定結果である。CODはD2地点を除き底部で高い値を示した。D2地点はE地点北部から流入する河川水により、表面のCODが高くなっているものと考えられる。また、採取地点によらずCODは10mg/L以上と比較的高い値を示した。加えて、アンモニウム態窒素がすべての測定地点において水面より底部が高い値を示した。亜硝酸態窒素と硝酸態窒素は水面とほぼ等しい測定値であった。これは溶存酸素濃度が低い底部の環境下ではアンモニア態窒

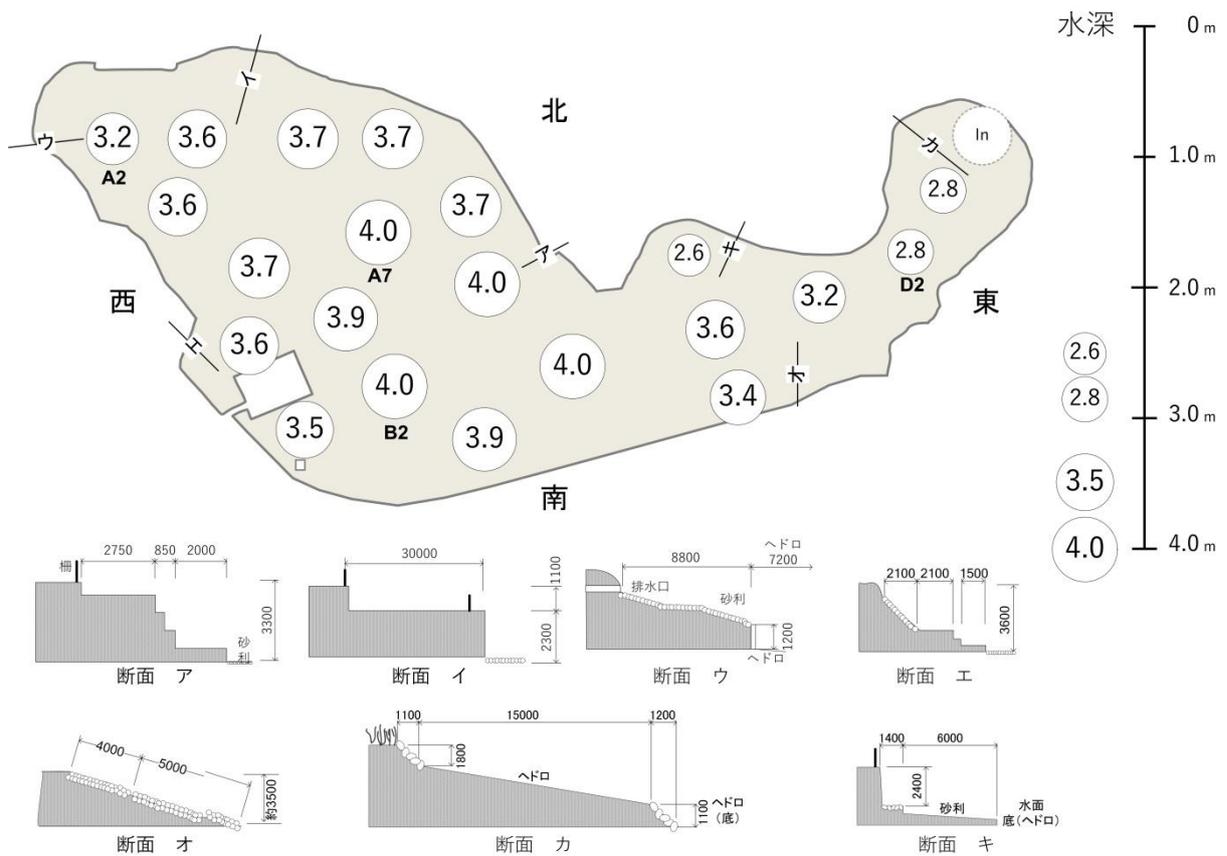


Figure 5 Water depth and waterside structure in Kado-ike.

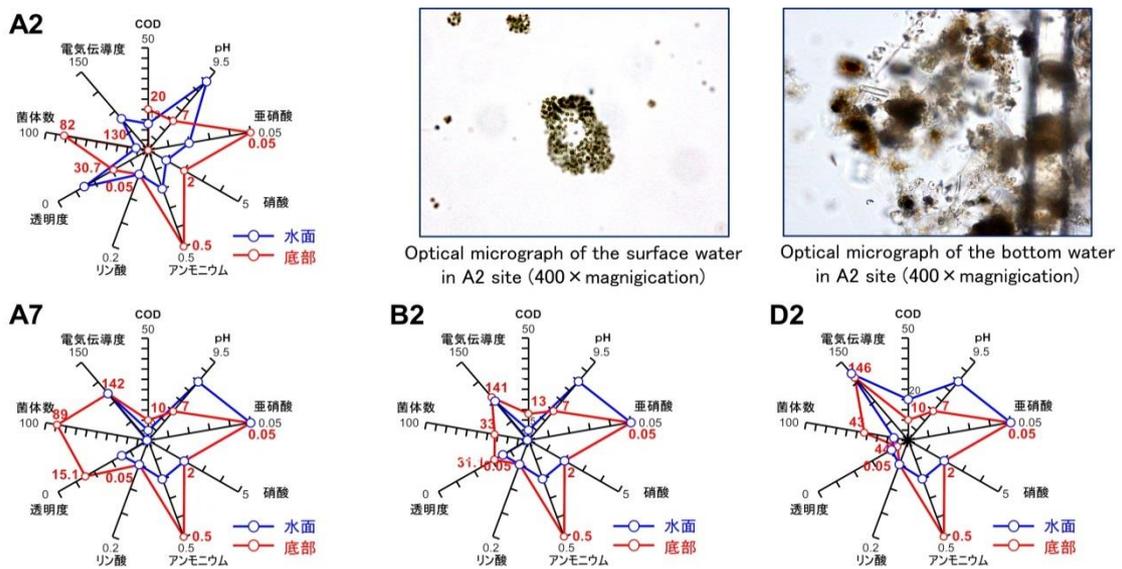


Figure 6 Result of the water quality survey in Kado-Ike bottom.

素が酸化される可能性が低いことによる。従って、水面に比べ底部に還元性の窒素源であるアンモニア態窒素を有する有機物が存在していることがわかった。

pH はすべての採取地点において、水面がアルカリ性、底部が中性であった。これは水面に浮遊する植物プランクトンにより日光が減衰し、底部においては植物プランクトンが生育できないためと考えられる。3.1 節に述べたように A2 地点では水面に植物プランクトンが大量に発生していたが、底部ではその影響がないため透視度が増加していた。

ハイロート採水器により底部の試料水を採取した際、すべての採取水に底質（固形物）が含まれていた。特に A7 地点ではハイロート採水器が底部にて底質を巻き上げ、透視度が大幅に低下した。A2 地点の水面水と底部水の光学顕微鏡写真を Figure 6 に示した。Figure 3 と同様に水面には植物プランクトンが観察されたが、底部には動物・植物プランクトンの死骸と考えられる底質が観察された。以上より、COD、アンモニア態窒素の測定結果を含め、門池底部には底質が堆積しているものと考えられる。一般にコイ、フナ等の底生性の魚（ベントス食魚）は湖底に生息するイトミミズやユスリカ幼虫等の底生生物を好んで食べる。門池ではコイも生息しており、底質の堆積が十分に考える。Figure 2 に示すように門池全般でアンモニウム態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素が一定濃度で観測された。門池は湖底にこれら窒素源を多く含む濁質（ヘドロ）が蓄積しており、ベントス食魚による巻き上げにより、すべての調査箇所から窒素源が観測されたと考えている。

#### 4. まとめ

平成 27 年 9 月 19 日に門池内 14 カ所の水質調査および水深測定を実施した。

各観測地点水面の水質調査を行なった結果、牧

堰用水からの流入水は一般的な河川下流の水質結果を示したが、門池東北部から流入する河川水は生活排水が流入している可能性が示唆された。流入口付近と流出口付近以外はほぼ同一の水質を示した。門池の湖面は全般的に植物プランクトンに起因する緑色を帯びており、日中は植物プランクトンの光合成によりアルカリ性を示した。

得られた水面付近の水質を、数値シミュレーションによる平面流れの結果と合わせて考察した。流入口付近では、比較的速い流速で渦状流れが形成されていることが予想され、この渦状流れの中に高い COD、リン酸態りんおよび硝酸態窒素が滞留保持されていることが考えられる。一方、流出口付近では流速が低いため植物プランクトンがウォッシュアウトすることなく大量発生していることが考えられる。池全体に複数の渦状流れが生じているため、流入口付近、流出口付近を除く池全体では、ほぼ同一の水質結果が得られたものと考えられる。

門池内の水深調査を行なった結果、門池の水深は東側（水深約 3 m）から西側（水深約 4 m）に向かって深くなっていた。門池内 4 地点の湖面水と湖底水を採取し水質調査を行なった結果、底部の pH は中性を示し、植物プランクトンの分布は日光が照射する水面付近に限られることがわかった。また、水面に比べ底部に還元性の窒素源であるアンモニア態窒素を有する有機物が存在していることがわかった。加えて顕微鏡観察結果より、門池底部には底質が堆積していることが示唆された。

一般に透視度の低い（濁質、植物プランクトンが増加）湖沼は、水中を透過する日光の減衰率が高く、湖底の植物群落が形成されなくなる[12]。これにより湖底に濁質・栄養塩が堆積し、コイ等の底生性の魚（ベントス食魚）の現存量が増加する。大垣らはベントス食魚が湖底の堆積物に生息するイトミミズやユスリカ幼虫等を食するとき

に湖底堆積物を巻き上げ、水中の濁質が増加し透視度が増加しない状況が保持されると報告している。このように富栄養化が進行し透視度が低下した場合を、栄養塩負荷量を減らしても透視度の高い状態に移行しない排他的な安定状態と定義している[13]。本研究で得られた結果より、現在の門池は排他的安定状態であるといえる。

今後門池を農業灌漑用ため池および親水公園として利用するにあたり、地域住民と門池に関係する団体・個人（門池に関係する地域社会）が門池の水環境について議論し、望ましい水環境を提言する必要がある。この提言に基づき望ましい水環境に準じた指標（水質、植生、魚種等）を定め、門池の現状を把握しつつ改善に向けた方策を決定するために、継続した環境調査を行なう必要がある。

## 謝辞

門池内の水質調査および水深調査を実施するにあたりボートの提供と漕手を担ってくださった狩野川ローイングクラブ・門池ボートクラブ代表 加藤愛夫氏に感謝の意を表します。門池の水深・水質調査および門池公園使用をお認めいただいた沼津市長、産業振興部農林農地課および都市計画部緑地公園課に感謝の意を表します。また、都市計画部緑地公園課には本論文内容の確認を頂き、併せて感謝申し上げます。本研究は平成27年度沼津高専校長リーダーシップ経費（学校運営活性化経費）の助成を受け実施した。

## 参考文献

- 1) 芳野恭士, 芳野文香, 芳野広起, 竹口昌之, 2007年~2011年における門池の水質の変化, *J. Technology and Education*, vol.20, No.1, pp.21-29 (2013).
- 2) 吉永育生, 農業用調整池ならびに水田湛水中の水質環境の形成に関する研究, 農工研報, vol. 47, pp.1-48 (2007).
- 3) 梅田信, 富岡誠司, 貯水池における水質環境要素と藻類増殖の関連, 水工学論文集, vol. 51, pp.1373-1378 (2007).
- 4) 国土交通省気象庁 気象データ (静岡県三島)
- 5) Open▽FOAM Official Home Page : <http://www.openfoam.com> (2018年6月26日参照)
- 6) Netgen Mesh Generator, 3D立方体メッシュジェネレータ, <https://ngsolve.org> (2018年12月11日参照)
- 7) 岡村尊史 (指導教員: 松本祐子), 水質改善に向けた門池内流れの数値解析, 平成24年度沼津工業高等専門学校機械・電気システム工学専攻学位授与論文
- 8) 国土交通省 関東地方整備局 霞ヶ浦河川事務所 霞ヶ浦の水質調査データ : <http://www.ktr.mlit.go.jp/kasumi/kasumi00012.html> (2018年9月1日参照)
- 9) 松下真太郎 (指導教員: 松本祐子), 非構造格子を用いた門池内流れの数値解析, 平成27年度沼津工業高等専門学校機械・電気システム工学専攻学位授与論文
- 10) 沼津市明治資料館, “牧堰・門池用水 水の恵みと人々の暮らし” 2007.9
- 11) 牧堰門池用水沿革史編纂委員会編, 牧堰門池用水沿革史, 沼津市門池牧堰用水運営委員会, 1979.3
- 12) 浅枝隆, 田中規夫, “湖沼およびダム湖の管理手法と整備”, (社)日本水環境学会編, 「水環境ハンドブック」朝倉書店, pp.54-58 (2006).
- 13) “湖沼の栄養塩レベルの変化による植物相の遷移と排他的安定状態”, 大垣眞一郎監修, (財)河川環境管理財団「河川の水質と生態系—新しい河川環境創出に向けて—」技報堂, pp.76-78 (2007).